

Пауль Кенфилд,  
Сергей Будько

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ СТАНОВИТСЯ ТЕПЛЕЕ

**Диборид магния  
становится  
сверхпроводящим  
при температуре  
в 40 К – абсолютный  
рекорд  
среди низко-  
температурных  
сверхпроводников.**

**П**редставьте, что, копая яму для пруда на своем дачном участке, вы вдруг натыкаетесь на золотую жилу или из земли начинает бить нефтяной фонтан. В похожей ситуации оказались учёные, занимающиеся физикой твердого тела, когда в 2001 г. было открыто, что диборид магния ( $MgB_2$ ) переходит в сверхпроводящее состояние при температурах, близких к 40 К – рекордно высокое значение для обычного низкотемпературного сверхпроводника!

Учёные начали изучать диборид магния еще в 1950-х гг., однако ничего необычного не нашли и отложили на полку, даже не подозревая о скрытых возможностях. Хотя температура в 40 К ( $-233^{\circ}\text{C}$ ) может показаться довольно низкой, она почти в два раза выше, чем температура перехода в сверхпроводящее состояние для ниобиевых сплавов (примерно 23 К), которые широко применяются в науке и промышленности. Теперь температуру фазового перехода второго рода можно достичь гораздо более дешевым способом, чем при использовании ниобиевых сплавов. Новый материал подойдет для создания сверхпроводящих магнитов и линий электропередач.

В отличие от высокотемпературных сверхпроводников (оксиды на основе меди, которые становятся сверхпроводящими при 130 К)  $MgB_2$  является традиционным низкотемпературным, хотя и необычным. За десятилетия поисков новых сверхпроводников с высокими температурами перехода физики сформулировали некоторые правила, которые определяют, какие комбинации элементов следует испытывать. Кроме того, многим казалось, что 23 К – это предел температуры для традиционного сверхпроводника. К большому удивлению, диборид магния вопреки всем правилам сдвинул планку в область более высоких температур.

Юун Акимицу (Jun Akimitsu) из Университета Аоямы Гакуина, Токио, объявил о своем открытии в январе 2001 г. Всего два месяца спустя на ежегодной мартовской встрече Американского физического общества прозвучало примерно сто двухминутных докладов о новом сверхпроводнике, а на сайте [arxiv.org](http://arxiv.org) появилось более 70 репринтов на эту тему. Взрыв активности научного сообщества был обусловлен несколькими причинами. Во-первых, получить относительно чистый  $MgB_2$  довольно

просто. Во-вторых, в распоряжении физиков, занимающихся изучением конденсированных сред, был Интернет. В результате появление нового простого сверхпроводника со сравнительно высокой температурой перехода инициировало бурную интеллектуальную деятельность.

## Подтверждение открытия

Сначала новости об открытии Акимицу распространялись устно и по электронной почте. Никаких подробных бумажных или электронных публикаций не было. Когда через несколько дней после слета физиков информация дошла до нашей группы, у нас возник ряд вопросов. Можем ли мы получить достаточно чистый диборид магния? Действительно ли он становится сверхпроводником при 40 К? (Ранее неоднократно сообщалось о различных сверхпроводящих соединениях с исключительно высокой температурой перехода, однако никому не удавалось воспроизвести опубликованные результаты.) Если  $MgB_2$  действительно является перспективным сверхпроводником, сможем ли мы раскрыть механизм его сверхпроводимости? И, наконец, удастся ли нам выявить глав-

ные свойства этого соединения? К счастью, на все вопросы был дан положительный ответ.

Когда Акимицу сообщил о своем открытии, у нас, как и у других научно-исследовательских коллективов, началась интересная жизнь. Мы с коллегами специализируемся на изучении физических свойств металлических соединений и поэтому сразу освободили все печи, задействованные в текущих экспериментах, и попытались получить  $MgB_2$ .

Диборид магния состоит из двух металлических элементов. Самый простой способ получить интерметаллид – просто сплавить элементы вместе. Но в данном случае такой метод не подходит, поскольку температуры плавления сильно различаются – 650°С для магния и выше 2000°С для бора. Так как при температуре выше 1100°С магний уже кипит, он испарился бы прежде, чем образовался интерметаллид.

Однако испарение магния удалось использовать в альтернативном способе получения. Мы заварили кусочек магния и порошок бора внутри химически инертной танталовой капсулы и нагрели смесь до 950°С, чтобы магний расплавился,

но не кипел. При такой температуре примерно треть магния испаряется и находится в динамическом равновесии с жидким металлом. Мы предполагали, что плотный магниевый пар за счет диффузии проникает в твердый бор, в результате чего получится  $MgB_2$ . Всего через два часа в капсуле получился диборид магния высокой чистоты в виде спеченных шариков, напоминающих песчаник. Не прошло и трех дней, а мы уже смогли убедиться, что полученное соединение действительно становится сверхпроводящим при заявленной температуре в 40 К.

Разобравшись с получением  $MgB_2$ , мы решили выяснить, объясняются ли его сверхпроводящие свойства традиционной теорией Бардина–Куппера–Шриффера (БКШ) (см. врезку на стр. 64). Если новое соединение окажется сверхпроводником нового типа, то можно будет говорить о выдающемся научном открытии. Если же его можно отнести к обычным сверхпроводникам, то потребуется научное объяснение исключительно высокой температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

По ряду причин среди некоторых исследователей устоялось мнение, что  $MgB_2$  не относится к стандартным сверхпроводникам, описываемым теорией БКШ. Во-первых, прежде чем в 1989 г. был открыт новый класс высокотемпературных сверхпроводников, в течение двух десятилетий считалось, что самая высокая температура сверхпроводящего перехода находится в районе 20 К. Некоторые теоретики предполагали, что предельная возможная температура сверхпроводящего перехода в рамках теории БКШ составляет примерно 30 К. Хотя высокотемпературные сверхпроводники на основе оксида меди существенно превысили этот предел, они, как полагают ученые, уже не относятся к сверхпроводникам типа БКШ. Во-вторых, относительная высокая температура сверхпро-

## ОБЗОР: ДИБОРИД МАГНИЯ

■ В 2001 г. выяснилось, что ничем не примечательный диборид магния становится сверхпроводником при 40 К, что почти в 2 раза выше критической температуры других похожих сверхпроводников. Рабочая температура  $MgB_2$  составляет приблизительно 20–30 К.

■ Диборид магния можно охлаждать жидким неоном или водородом, а также с помощью холодильных установок с замкнутым циклом. Все эти способы гораздо дешевле, чем охлаждение жидким гелием (4 К), которое требуется для ниобиевых сплавов, широко применяемых в промышленности.

■ Диборид магния с примесью углерода и других элементов ведет себя не хуже, а иногда даже лучше, чем ниобиевые сплавы, и остается сверхпроводящим в присутствии сильных магнитных полей и электрических токов. Новый сверхпроводник можно использовать для создания мощных магнитов, экономичных линий электропередач и сверхчувствительных детекторов магнитного поля.

водящего перехода у  $MgB_2$  (так называемая критическая температура,  $T_c$ ) нарушает одно из основополагающих правил для интерметаллических соединений, которое гласит, что, чем больше электронов может участвовать в фазовом переходе к сверхпроводящему состоянию, тем выше будет температура перехода. Как известно, ни магний, ни бор не могут дать интерметаллиду  $MgB_2$  много электронов.

Только непосредственный эксперимент мог показать, подчиняется ли этот сверхпроводник теории БКШ. Ключевую роль в ней играют колебания кристаллической решетки. Представьте себе, что составляющие ее тяжелые положительные ионы удерживаются на своих местах сильными пружинами (химическими связями). Возбуждение кристаллической решетки, например, при нагревании проявляется в виде колебания ионов на характеристических частотах. Теория БКШ предсказывает, что температура перехода в сверхпроводящее состояние пропорциональна частоте колебаний решетки. Для объектов одинаковой формы и размера, чем ниже массовое число материала, тем выше характеристические частоты колебаний. Применяя различные изотопы магния и бора, мы можем составить интерметаллид  $MgB_2$  из атомов различной массы, чтобы изменить частоту колебаний решетки и определенным образом повлиять на критическую температуру  $T_c$ .

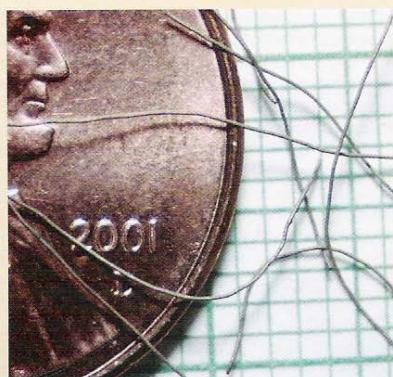
Есть два устойчивых изотопа бора: бор-10 и бор-11. Согласно теории БКШ,  $T_c$  для двух образцов  $MgB_2$ , сделанных на основе бора-10 и бора-11, должны отличаться на 0,85 К. На первых спеченных шариках  $MgB_2$  мы обнаружили изменение в 1 К. Немного большее изменение  $T_c$  по сравнению с ожидаемым может быть истолковано в рамках теории БКШ как указание на то, что колебания атомов бора более существенны для создания состояния сверхпро-

Через две недели с момента объявления о сверхпроводимости  $MgB_2$  мы разработали технологию изготовления проводов из этого замечательного сверхпроводника. Интерметаллид  $MgB_2$  образуется при взаимодействии паров магния с бором. Этот процесс продолжается нескольких часов при температуре около 1000°C. Бор захватывает пары магния из окружающей среды и превращается в  $MgB_2$ , заметно увеличиваясь в размерах. Длина волокон бора может достигать сотен метров. В эксперименте мы использовали нити диаметром от 0,1 мм до 0,3 мм.

Отрезки проводов идеально подходят для исследования свойств диборида магния. Однако чтобы их можно было использовать на практике, сверхпроводник следуют заключить в прочную пластичную проводящую оболочку. По ней потечет ток, если  $MgB_2$  утратит сверхпроводимость и окажется под угрозой перегрева. Исследователям пока не удалось создать подходящий материал для оболочки.

Более распространенный метод изготовления проводов заключается в следующем. Смесь порошков магния и бора либо порошок  $MgB_2$  помещают в трубку, которую вытягивают в провод. Затем его отжигают и получается цельная структура. Таким способом удается получать образцы длиной от десятков до сотен метров.

Несмотря на то что сверхпроводимость диборида магния была открыта совсем недавно, на него уже обратили внимание коммерческие компании, например, *Diboride Conductors* и *Hyper Tech Research*, занимающиеся созданием и улучшением проводов из  $MgB_2$ , а также крупная фирма *Specialty Materials*, имеющая большой опыт производства нитей из бора.



Провода получаются при взаимодействии паров магния с нитью из бора.



На фотографии поперечного сечения проводника из диборида магния виден центральный сердечник из борида вольфрама диаметром 0,015 мм.

водимости, чем колебания атомов магния (см. врез на стр. 65).

Близость экспериментального значения к расчетным 0,85 К показывает, что поведение  $MgB_2$ , скорее всего, укладывается в рамки теории БКШ. Очевидно, предположение о том, что верхний предел низкотемпературной сверхпроводимости располагается на уровне 30 К, неверно. Это хорошая новость, поскольку с традиционными интерметаллидными сверхпроводниками гораздо легче иметь дело, чем со сверхпроводниками на основе оксида меди. Не прошло и ночи, а мы

уже научились получать удобные в применении провода из  $MgB_2$ , просто подвергая ниточку из бора воздействию паров магния (см. вставку вверху).

### Применение сверхпроводников

Хотя сверхпроводимость наблюдается только при низких температурах, сегодня она находит широкое применение. Наиболее ценное свойство сверхпроводников – способность проводить высокие токи без потерь энергии и без нагрева. Например, сверхпроводящий ▶

# ИСТОРИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. датским физиком Хейке Камерлинг-ОНнесом (Heike Kamerlingh Onnes), который занимался исследованием электрических свойств металлов при низких температурах и использовал жидкий гелий в качестве хладагента. Ко всемобщему удивлению выяснилось, что при температуре примерно 4,2 К ртуть внезапно перестает оказывать сопротивление электрическому току. Температуру перехода в сверхпроводящее состояние называли критической температурой ( $T_c$ ).

За следующие полвека исследований были открыты все основные сверхпроводники – чистые металлы и интерметаллиды, состоящие из двух и более металлических элементов. Однако до середины 1980-х гг. максимальное значение критической температуры лишь немногого превышало 20 К.

Все изменилось в 1986 г., когда была открыта высокотемпературная сверхпроводимость у многих соединений на основе оксида меди. Всего за несколько лет максимальная критическая температура сложных оксидов на основе ртути, бария, кальция и меди подскочила почти до 130 К. Вскоре стало ясно, что ставшая традиционной теория Бардина–Куппера–Шраффера (см. врезку на стр. 64) не в состоянии объяснить сверхпроводимость этих материалов. За 20 лет интенсивных исследований ученым так и не удалось

разработать теорию, объясняющую, почему сложные оксиды становятся сверхпроводящими при столь высоких температурах.

Высокотемпературные сверхпроводники оказались крепким орешком. Точное измерение их физических свойств весьма затруднено, поскольку подобные материалы очень трудно получить в виде монокристалла или добиться высокой очистки от примесей. Кроме того, сделать из них пригодный к использованию провод совсем не просто, т.к. для этого необходимо ориентировать отдельные зерна оксидного сверхпроводника в одном направлении. Одним словом, ученые и инженеры готовы были оставить сложные оксиды ради более простых в обработке интерметаллидных сверхпроводников, лишь бы критическая температура последних была существенно выше 20 К.

С начала нового тысячелетия сверхпроводимость стали получать сравнительно простыми и дешевыми способами. Оксиды охлаждают примерно до 77 К жидким азотом, а интерметаллические соединения, такие как  $Nb_3Sn$ , – до 4 К жидким гелием. Последние находят применение в мощных магнитах, входящих в состав медицинского оборудования.

Открытие сверхпроводимости диборида магния, простого интерметаллида с критической температурой чуть ниже 40 К, оказалось настоящим подарком для ученых и инженеров.



магнит может создавать магнитные поля мощностью свыше 20 Тл (при мерно в 500 раз больше, чем дают типичные охлаждаемые электромагниты). Низкотемпературные сверхпроводящие магниты используются в лабораториях и в больницах для ядерно-магнитно-резонансной томографии. Объем продаж магнитов из ниобиевых интерметаллидов и сплавов неуклонно растет.

Другая перспективная сфера применения – создание линий электропередач, передающих токи большой плотности практически без потерь. Исследователи уже успешно провели несколько опытных образцов на основе оксида меди, охлаждаемого жидким азотом примерно до 70 К.

Вообще говоря, чтобы применять сверхпроводники, их следует охлаждать до 0,5–0,7  $T_c$ , потому что

большие электрические токи или сильные магнитные поля при критической температуре уничтожают сверхпроводимость. Следовательно, если  $T_c=20\text{ K}$ , то рабочая температура составит 10 К, и сверхпроводник придется охлаждать неудобным и дорогим жидким гелием.

Ученые-прикладники заинтересовались диборидом магния потому, что его легче остудить до реальных рабочих температур, чем

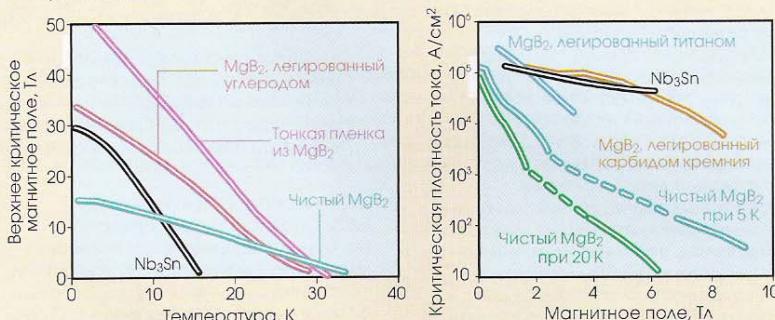
применяемые сегодня ниобиевые сплавы и капризные сложные оксиды. Сверхпроводник  $MgB_2$  можно охлаждать либо жидким водородом или неоном, либо с помощью дешевых рефрижераторов с замкнутым циклом, обеспечивающих температуру ниже 20 К.

Однако прежде, чем начать использовать диборид магния в промышленности, следует выяснить, насколько хороши его характеристики. Особое внимание обычно уделяется так называемой смешанной фазе, в которой сверхпроводимость частично уничтожается магнитным полем. При практическом применении сверхпроводник находится именно в таком состоянии. Слабые магнитные поля не влияют на сверхпроводимость: сверхпроводящие области проводника вытесняют их и не теряют своих свойств. Магнитные поля средней напряженности проникают в сверхпроводник и образуют в нем маленькие трубки магнитного потока, которые называются вихрями. Их внутренняя часть перестает быть сверхпроводящей, однако окружающий материал остается сверхпроводником.

В смешанной фазе материал все еще проявляет сверхпроводящие свойства. С ростом напряженности приложенного магнитного поля объем, занятый вихрями, увеличивается. В конце концов они начинают перекрываться, и материал перестает быть сверхпроводником. Напряженность магнитного поля, при которой пропадает сверхпроводимость, называется верхней критической напряженностью магнитного поля (*upper critical field*). Это ключевая характеристика, определяющая практическую ценность сверхпроводника.

На практике обычно применяются как можно более сильные магнитные поля, которые, впрочем, всегда слабее предельного, чтобы в целом сохранилась сверхпроводимость. Поэтому главная цель исследова-

Перспективность применения того или иного сверхпроводника определяется тем, как он пропускает электрический ток, находясь в магнитном поле. На графиках видно, что легирование примесями улучшает физические характеристики  $MgB_2$  и делает его не хуже, а в чем-то даже лучше применяемого в промышленности  $Nb_3Sn$ . Левый график показывает, что тонкая пленка из диборида магния с неизвестным содержанием примесей и провод из диборида магния, легированного углеродом, при любых температурах сохраняют сверхпроводимость в сильном магнитном поле лучше, чем  $Nb_3Sn$ . Кривые справа (построены при 4 К за исключением особо отмеченных случаев) свидетельствуют о том, что  $MgB_2$ , легированный карбидом кремния, не хуже  $Nb_3Sn$  пропускает сильные токи. Штриховой линией обозначены данные, полученные с помощью интерполяции.



телей – получить максимальный диапазон температур и магнитных полей, при которых сохраняется смешанная сверхпроводимость. При температуре чуть ниже  $T_c$  верхняя критическая напряженность поля практически равна нулю: даже слабенькое магнитное поле уничтожает сверхпроводимость. При более низких температурах сверхпроводимость сохраняется в условиях более сильных магнитных полей (см. вставку выше).

К счастью, верхняя критическая напряженность поля диборида магния зависит от технологии его производства. Например, если 5% бора заменить углеродом, она может увеличиться более чем в 2 раза! Кроме того, оказалось, что тонкие пленки из  $MgB_2$  характеризуются намного более высокими значениями верхней критической напряженности поля, чем пленки из станинда ниobia ( $Nb_3Sn$ ). Исследователям очень важно разобраться в этом феномене и выяснить, что способствует такому увеличению: малое содержание кислорода, структурные напряжения или незамеченная примесь, легирующая пленку непредсказуемым образом. Так или

иначе, совершенно ясно, что диборид магния – многообещающий материал для производства сверхпроводящих магнитов, которые будут работать при более высоких температурах и, возможно, более сильных магнитных полях, чем станинди ниobia, который широко используется сегодня.

## ОБ АВТОРАХ:

**Пауль Кенфилд** (Paul C. Canfield) и **Сергей Будько** (Sergey L. Bud'ko) работают в Лаборатории Эймса министерства энергетики США, штат Айова. Кенфилд занимает пост профессора физики и астрономии в Университете штата Айова. Он занимается созданием новых сверхпроводящих материалов и изучением низкотемпературных электронных и магнитных состояний металлических соединений. Будько изучает термодинамические, магнитные и проводящие свойства новых материалов, плазменные колебания в металлах и полуметаллах, физические свойства различных веществ при высоком давлении, мощном магнитном поле и сверхнизких температурах.

**В** 1957 г. Джон Бардин, Леон Куппер и Роберт Шриффер предложили теорию сверхпроводимости металлов. В обычном, не сверхпроводящем материале поток электров рассеивается на дефектах кристаллической решетки, которые и создают электрическое сопротивление. Согласно теории БКШ, сверхпроводимость наступает тогда, когда электронный газ начинает перемещаться как единый коллективный объект, движущийся без рассеивания.

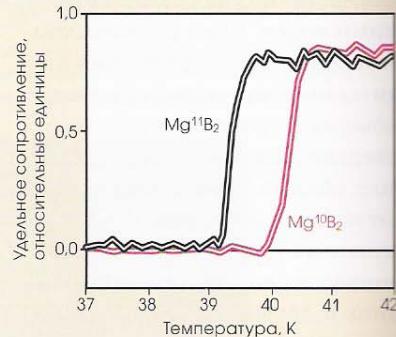
Мельчайшим элементом нового электронного состояния являются так называемые куплеровские пары, состоящие из двух слабо связанных друг с другом электронов. Невозможное на первый взгляд притяжение двух одинаково заряженных частиц возникает из-за того, что металл состоит не только из электронов, но и из положительных ионов. Движущийся в металле электрон оставляет за собой след в виде кратковременных искажений кристаллической решетки, притягивающих другой электрон, образующий вместе с первым куплеровскую пару. (Говоря точнее, спаривание электронов происходит под воздействием колебаний решетки определенной частоты.) Здесь можно провести аналогию с детьми, прыгающими на батуте: хотя они напрямую не связаны, деформации батута во время прыжков будут способствовать их сближению.

Куплеровские электронные пары начинают накладываться друг на друга, при температуре ниже критической ( $T_c$ ) образуют электронное состояние, охватывающее весь проводник, и перестают испытывать электрическое сопротивление.



Формирование куплеровских пар в конечном итоге приводит к сверхпроводимости. Один электрон оставляет за собой искажения решетки, состоящей из положительно заряженных ионов (левый рисунок). Вскоре другой электрон притягивается сгущением положительно заряженных ионов (правый рисунок). В результате оба электрона оказываются слабо связанными.

Согласно упрощенной теории БКШ,  $T_c$  зависит от трех свойств материала: количества электронов, которые могут участвовать в создании состояния сверхпроводимости (чем больше электронов, тем выше  $T_c$ ), характеристической частоты колебаний решетки, вовлекающих электроны в образование куплеровских пар (чем выше частота, тем выше  $T_c$ ), и силы сцепления между искажениями решетки и электронами (чем сильнее сцепление, тем выше  $T_c$ ). В течение многих десятилетий исследователи занимались в основном оптимизацией перечисленных свойств, пытаясь получить как можно более высокое значение  $T_c$ . Раньше предпочтение отдавалось первым двум характеристикам материала. Судя по всему, диборид магния обладает столь высокой критической температурой из-за более сильного сцепления электронного газа с искажениями решетки (третья характеристика).



Удельное сопротивление диборида магния падает до нуля, когда материал охлаждают ниже его критической температуры (приблизительно 40 К). Критическая температура образцов на основе бора-10 и бора-11 различается. Это согласуется с теорией БКШ и свидетельствует о том, что  $MgB_2$  – традиционный сверхпроводник.

Другой важной характеристикой является критическая плотность тока – максимальное отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника, при котором последний остается в сверхпроводящем состоянии. Когда плотность тока превышает критическую, внутри проводника начинают скользить магнитные вихри, что приводит к потере энергии и возникновению ненулевого электрического сопротивления. Чтобы противостоять этому, вихри можно зафиксировать, введя в сверхпроводник нужный тип кристаллических дефектов. Часто эффект фиксации удается усилить

в результате уменьшения зерна (отдельных кристаллитов) материала, которое приводит к увеличению поверхности, на которой тормозятся вихри. Добавление микроскопических включений оксида иттрия или диборида титана тоже способствует фиксации вихрей.

Основная трудность, связанная с созданием применимого на практике  $MgB_2$ , состоит в увеличении критической плотности тока при сильных магнитных полях. В слабых полях критическая плотность тока для чистого  $MgB_2$  сопоставима с таковой для  $Nb_3Sn$ , но в сильных она падает намного быстрее. Это

серьезное препятствие для использования диборида магния в мощных магнитах. Впрочем, изучение нового материала ведется очень активно, и ученые надеются в скором будущем добиться заметного улучшения его характеристик.

### Прошлое, настоящее и будущее

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в дибориде магния – это итог десятилетий упорных исследований, а также напоминание о том, что у каждого сформулированного теоретиками правила есть исключения. Хотя

$MgB_2$  известен уже более полувека, его никогда не проверяли на сверхпроводимость, потому что он не соответствовал устоявшемуся представлению о перспективных сверхпроводящих интерметаллидах. К счастью, в поисках новых материалов мы иногда слышим голос природы за шумом собственных предубеждений.

За последние четыре года мы многое узнали о сверхпроводимости диборида магния. Теперь нам ясно, каковы свойства высокочищенного  $MgB_2$ , знаем, как изменить его, чтобы расширить диапазон допустимых магнитных полей и плотностей тока, при которых имеет смысл его практическое применение. Уже проведено пробное изготовление покрытий на сверхпроводящие провода из  $MgB_2$  и даже сделаны экспериментальные магниты. Однако еще нужно приложить немалые усилия, чтобы оптимизировать свойства удивительного сверхпроводника, детально проработать технологию его обработки, а также подобрать подходящий материал для покрытия проводов.

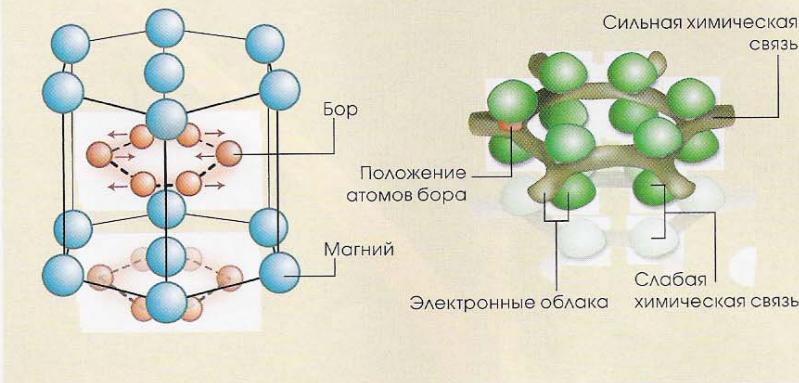
В целом применение  $MgB_2$  выглядит весьма перспективным. Действительно, если произойдет переориентация экономики на водородное топливо, то  $MgB_2$  мог бы занять свою промышленную нишу. Если потребуется производить большие количества водорода, например, для модульных газоохлаждаемых ядерных реакторов с шаровыми ТВЭЛами (*pebble bed modular gas cooled reactor, PBMR*), то придется решать проблему его транспортировки. Возможно, появятся теплоизолированные трубы, несущие жидкий водород при температуре ниже 20 К (точка кипения водорода). В их термоизоляции могли бы расположиться электрические кабели из диборида магния. Хотя сегодня такой проект смахивает на научную фантастику, не исключено, что в будущем он будет серьезно изучен.

Главная причина удивительно высокой критической температуры диборида магния – сильное взаимодействие электронов с определенными модами колебаний решетки, обусловленное структурой соединения и типом его связей.

Атомы бора в  $MgB_2$  образуют шестиугольную сотовидную структуру (обозначено красным на левом рисунке). Слои бора отделены друг от друга слоями атомов магния (синий). Электроны, ответственные как за обычную электрическую проводимость, так и за сверхпроводимость, предоставляются атомами бора и участвуют в одном из двух типов связей (см. правый рисунок). В пределах слоев бора располагаются сильные химические связи; между слоями они намного слабее.

На электроны проводимости, участвующие в планарных связях, очень сильно воздействуют продольные колебания атомов (показано стрелками на рисунке слева). В результате возникает электронное состояние, обеспечивающее сверхпроводимость при более высоких температурах.

Изучение диборида магния помогло ученым ответить на интереснейший вопрос физики сверхпроводников: может ли сформироваться состояние сверхпроводимости из двух различных подсистем куплеровских пар? Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что в  $MgB_2$  все так и обстоит: новый сверхпроводник стал первым красноречивым примером такого явления.



## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride. Jun Nagamatsu et al. in *Nature*, Vol. 410, pages 63–64; March 1, 2001.
- Magnesium Diboride: One Year On. Paul C. Canfield and Sergey L. Bud’ko in *Physics World*, Vol. 15, No. 1, pages 29–34; January 2002.
- Energy for the City of the Future. Paul M. Grant in *Industrial Physicist*, Vol. 8, No. 1, pages 22–25; February/March 2002. Available at [www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf](http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf)
- Magnesium Diboride: Better Late than Never. Paul C. Canfield and George W. Crabtree in *Physics Today*, Vol. 56, No. 3, pages 34–40; March 2003.
- Superconductivity in  $MgB_2$ : Electrons, Phonons and Vortices. Edited by Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud’ko and Paul C. Canfield. *Physica C*, Vol. 385, Nos. 1–2; March 2003.